



PRÓBA OKREŚLENIA CZYNNIKÓW DETERMINUJĄCYCH ODKSZTAŁCENIA HARTOWNICZE W PROCESACH OBRÓBKII CIEPLNEJ STALI

K. Uściński^{1,*}, S. Marciniak¹

¹ Zakład Inżynierii Powierzchni, Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Warszawska, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: konrad.uscinski@nanostal.eu

Streszczenie

Odkształcenia hartownicze towarzyszą w zasadzie wszystkim obróbkom cieplnym stali. Ich obecność tłumaczy się poprzez występowanie naprężeń pochodzenia strukturalnego oraz cieplnego, na które składa się wiele czynników, między innymi: geometria przedmiotu, skład chemiczny, mikrostruktura, wielkość ziaren, temperatura obróbki cieplnej, występowanie gradientów temperatury na długości lub w przekroju elementu w procesach grzania i chłodzenia, rodzaj oraz szybkość chłodzenia medium chłodzącego. Do tej pory nie udało się jednoznacznie określić w jakim stopniu każdy z czynników składa się na sumaryczny wynik wielkości odkształcenia hartowniczego. W tym artykule przedstawione zostały wyniki badań odkształceń hartowniczych stali w zależności od następujących parametrów: intensywności chłodzenia, wielkości ziaren austenitu pierwotnego, rodzaju obróbki cieplnej wraz z temperaturą hartowania izotermicznego.

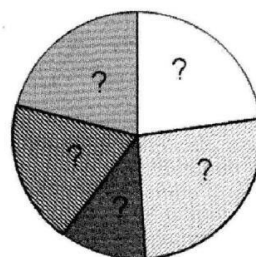
Słowa kluczowe: Odkształcenia hartownicze; Naprężenia; Wielkość ziarna; Intensywność chłodzenia; Hartowanie izotermiczne

1. Wprowadzenie

Obróbce cieplnej stali polegającej na grzaniu, wyżarzaniu i chłodzeniu z reguły towarzyszą procesy przemian fazowych. Są one źródłami naprężeń cieplnych oraz strukturalnych. Naprężenia cieplne powstają na skutek nierównomiernych dylatacyjnych zmian wymiarów w wyniku gradientu temperatury, natomiast naprężenia strukturalne wywołane są przemianami fazowymi i zmianami w objętości właściwej faz. Bezpośrednim skutkiem naprężeń są odkształcenia hartownicze powodujące zmianę wymiarów i geometrii obrabianego przedmiotu [1]. Często zmiana geometrii jest na tyle duża, że element nie nadaje się do użytku, a doprowadzenie przedmiotu do pożądanego wymiarów za pomocą obróbki plastycznej lub mechanicznej jest niemożliwe bądź zbyt kosztowne. W toku prac dążących do minimalizacji zmian wymiarowych obrabianych elementów ujawniono czynniki, które je generują [2], jednak wciąż nie określono w jakim stopniu poszczególne czynniki wpływają na sumaryczną wielkość odkształceń hartowniczych.

Rysunek 1. przedstawia szacunkowy wpływ poszczególnych grup czynników na odkształcenia hartownicze. Można wyszczególnić więcej czynników, należą do nich: geometria przedmiotu, skład chemiczny, stopień segregacji składników, ilość wtrąceń, hartowność, metody obróbki plastycznej, skład fazowy, wielkość ziaren, temperatury obróbki cieplnej, intensywność chłodzenia, medium chłodzące, itd. Z praktycznego punktu widzenia istotna jest znajomość w jakim stopniu dany czynnik wpływa na całkowitą wielkość odkształceń hartowniczych generowanych w trakcie całego procesu obróbki cieplnej.

W tym celu w pracy zaplanowane oraz przeprowadzone zostały badania, w których zmienną stanowią pojedyncze czynniki.



- geometria
- skład chemiczny
- mikrostruktura
- temperatura
- obróbka plastyczna

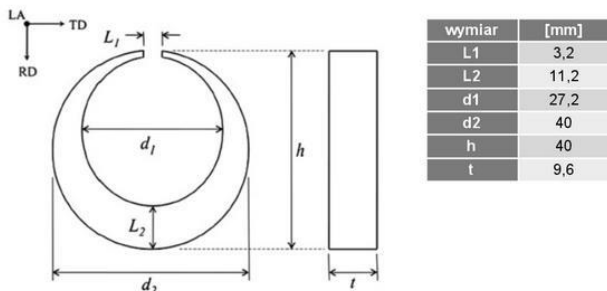
Rys. 1. Szacunkowy wpływ czynników na odkształcenia hartownicze [2]

W tym artykule przedstawione zostały wyniki badań dotyczących wpływu: intensywności chłodzenia, wielkości ziaren austenitu pierwotnego, rodzaju obróbki cieplnej wraz z temperaturą hartowania izotermicznego na wielkość odkształceń hartowniczych w obrabianych cieplnie stalach: 42NiSiCrMo8-7-3F, 38CrAlMo7-10, X37CrMoV5-1.

2. Metodyka badań

Badania odkształceń hartowniczych przeprowadzone zostały na specjalnych próbkach o kształcie dysku o średnicy 40mm z wyciętym mimośrodowo okręgiem o średnicy 27,2mm

analogicznie jak w pracy [3]. W miejscu gdzie ścianka jest najcieńsza została wykonana szczelina o szerokości około 3,2mm.



Rys. 2. Schemat próbki do pomiaru wielkości odkształceń hartowniczych

Jako miarę odkształceń hartowniczych przyjęto zmianę szerokości szczeliny w odniesieniu do jej wartości początkowej którą wyliczano ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{|L_p - L_k|}{L_p} * 100\%$$

gdzie: ε - stopień odkształcenia [%]; L_p - początkowa szerokość szczeliny [mm]; L_k - końcowa szerokość szczeliny [mm]

Początkowe oraz końcowe rozwarcie szczeliny wyznaczano na podstawie pomiarów mikroskopowych przy użyciu NIKON Eclipse MA200. Wielkości te były za każdym razem uśredniane na podstawie 6 pomiarów. Procesy austenitizacji wykonane zostały w komorowym piecu gazoszczelnym FCF-V12PrG w atmosferze azotu.

Do każdego badania stal była dobierana tak, aby wykorzystać konkretne właściwości danej stali. Badania wpływu intensywności chłodzenia na odkształcenia hartownicze przeprowadzono na próbkach ze stali 42NiSiCrMo8-7-3F, wpływu wielkości ziaren austenitu pierwotnego na odkształcenia hartownicze – na próbkach ze stali 38CrAlMo7-10, wpływu temperatury hartowania izotermicznego na odkształcenia hartownicze – na próbkach ze stali X37CrMoV5-1.

Tab. 1. Skład chemiczny stali 42NiSiCrMo8-7-3F

Pierwiastek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
Średnia zawartość [% wag.]	0,39	0,62	1,54	0,72	1,66	0,32	0,1	0,1

Tab. 2. Skład chemiczny stali 38CrAlMo7-10

Pierwiastek	C	Mn	Si	Cr	Mo	Al	Cu
Średnia zawartość [% wag.]	0,39	0,41	0,33	1,45	0,19	0,9	0,12

Tab. 3. Skład chemiczny stali X37CrMoV5-1

Pierwiastek	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V	Cu
Średnia zawartość [% wag.]	0,38	0,41	1,01	4,92	1,10	0,16	0,37	0,14

3. Wyniki badań i ich dyskusja

3.1. Wpływ intensywności chłodzenia na odkształcenia hartownicze

Do zbadania wpływu szybkości chłodzenia na odkształcenia hartownicze użyto próbek wykonanych ze stali 42NiSiCrMo8-7-3F. Zostały one poddane austenityzowaniu w 900°C w czasie 20 minut, po czym były chłodzone w ośrodku chłodzącym wodol70 oraz w wodzie. Wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 4.

Tab.4. wyniki badania odkształceń hartowniczych w stali 42NiSiCrMo8-7-3F

Oznaczenie próbki	L_p [mm]	L_k [mm]	ε [%]
A	3,78	3,83	1,3
B	3,63	4,65	28,1

Rodzaj stali, temperatura oraz czas obróbki w obu przypadkach były jednakowe, jedyną zmienną stanowiło medium chłodzące. W przypadku próbki A, którą chłodzono w wodol70 odkształcenie hartownicze wyniosło 1,3%, natomiast w przypadku próbki B chłodzonej w wodzie aż 28,1%. Ogromna różnica w stopniu odkształceń hartowniczych wynika z różnych intensywności chłodzenia poszczególnych mediów. Woda jako medium o większej intensywności chłodzenia, chłodzi szybciej, a większa różnica temperatur pomiędzy rdzeniem, a powierzchnią próbki powoduje duże naprężenia cieplne wywołujące odkształcenia. W przypadku mniej intensywnego chłodzenia, ale wystarczającego na uzyskanie struktury martenzytycznej na wskroś, odkształcenia hartownicze mogą zostać zminimalizowane.

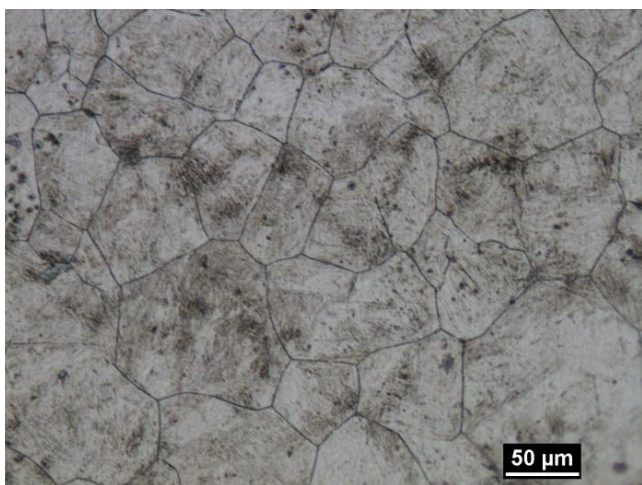
3.2. Wpływ wielkości ziarna austenitu pierwotnego na odkształcenia hartownicze

W celu zbadania wpływu wielkości ziarna austenitu pierwotnego na stopień odkształceń hartowniczych zaplanowano badanie, w którym zmienną stanowiła temperatura austenitizowania. Im temperatura austenitizowania jest większa, tym ziarno bardziej się rozrasta. Badania przeprowadzono na stali 38CrAlMo7-10 mającej skłonność do rozrostu ziarna austenitu. Po austenitizacji w różnych temperaturach wszystkie próbki były powolnie chłodzone do jednakowej temperatury 900°C, a następnie chłodzone w wodol70 dla uzyskania struktury martenzytycznej. Aby zmierzyć średnią wielkość ziarna austenitu pierwotnego próbki zostały poddane trawieniu w odczynniku składającym się z: nasyconego kwasu pikrynowego, związków alkilo-sulfonianowych oraz chlorku miedzi. Trawiono odczynnikiem podgrzanym do temperatury 60°C w czasie 1 - 3 minut.

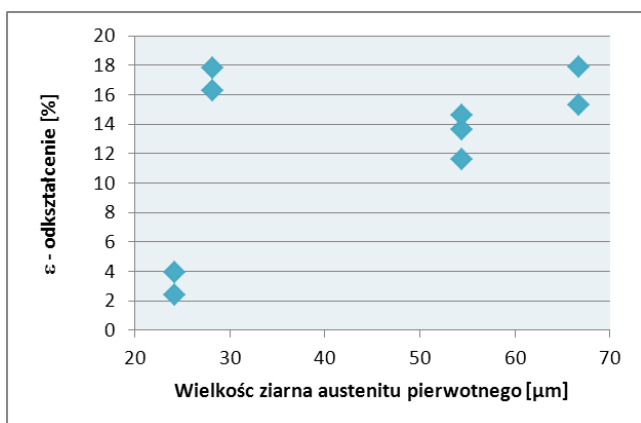
Tabela 5. przedstawia parametry przeprowadzonych procesów, uzyskaną wielkość ziarna austenitu pierwotnego oraz stopień odkształceń hartowniczych. Widać, że zgodnie z założeniami średnia wielkość ziarna austenitu pierwotnego wzrasta wraz ze wzrostem temperatury austenitizacji. Można zauważyć, że wzrostowi średniej wielkości ziarna austenitu pierwotnego towarzyszy pewien trend wzrostu stopnia odkształceń hartowniczych, jednak nie jest to bezpośrednia zależność (rys. 4.). Próbki E oraz F austenitizowane w temperaturze 930°C wykazują odkształcenia większe od próbek austenitizowanych w 950°C (G, H, I) oraz porównywalne do próbek austenitizowanych w 1000°C (J, K).

Tab. 5. Parametry procesów obróbki cieplnej oraz wyniki badania odkształceń hartowniczych w stali 38CrAlMo7-10

Oznaczenie próbki	Temperatura austenitizacji [°C]	Wielkość ziarna [μm]	L _p [mm]	L _k [mm]	ε [%]
C	900	24,17	3,12	3,0	3,9
D			2,86	2,79	2,4
E	930	28,17	3,06	2,56	16,3
F			3,08	2,53	17,8
G	950	54,38	3,00	2,65	11,6
H			3,08	2,66	13,6
I			3,08	2,63	14,6
J	1000	66,70	3,00	2,54	15,3
K			3,13	2,57	17,9

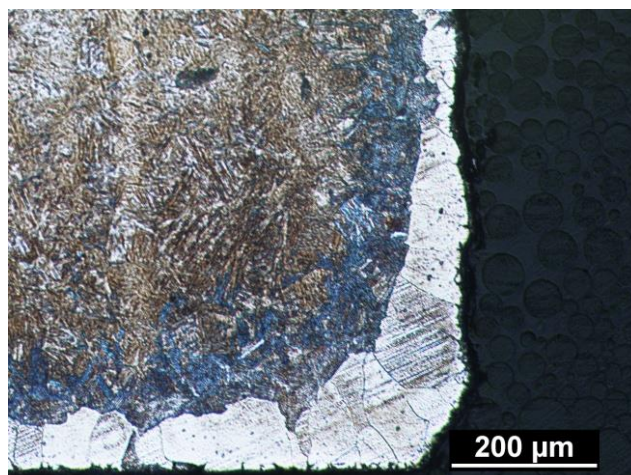


Rys. 3. Ziarna austenitu pierwotnego, stal 38CrAlMo7-10 austenitizowanie 1000°C / 20 minut, powiększenie x200

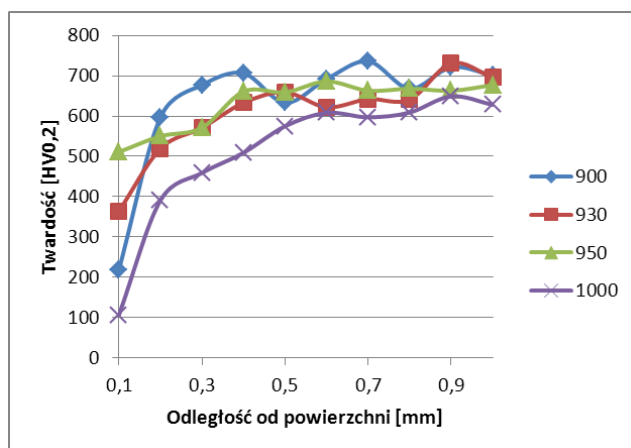


Rys. 4. Zależność wielkości odkształcenia hartowniczego w funkcji wielkości ziarna austenitu pierwotnego, stal 38CrAlMo7-10

Na podstawie rysunku 4. można zauważyć, że wzrost średniej wielkości ziarna austenitu pierwotnego powyżej pewnej wartości nie prowadzi do dalszego wzrostu stopnia odkształceń hartowniczych w stali 38CrAlMo7-10. Dochodzi do stabilizacji, stopień odkształceń hartowniczych pozostaje podobny przy rosnącej średniej wielkości ziarna austenitu pierwotnego.



Rys. 5. Odwęglona warstwa przy powierzchni, stal 38CrAlMo7-10 austenitizowanie 1000°C / 20 minut, powiększenie x100

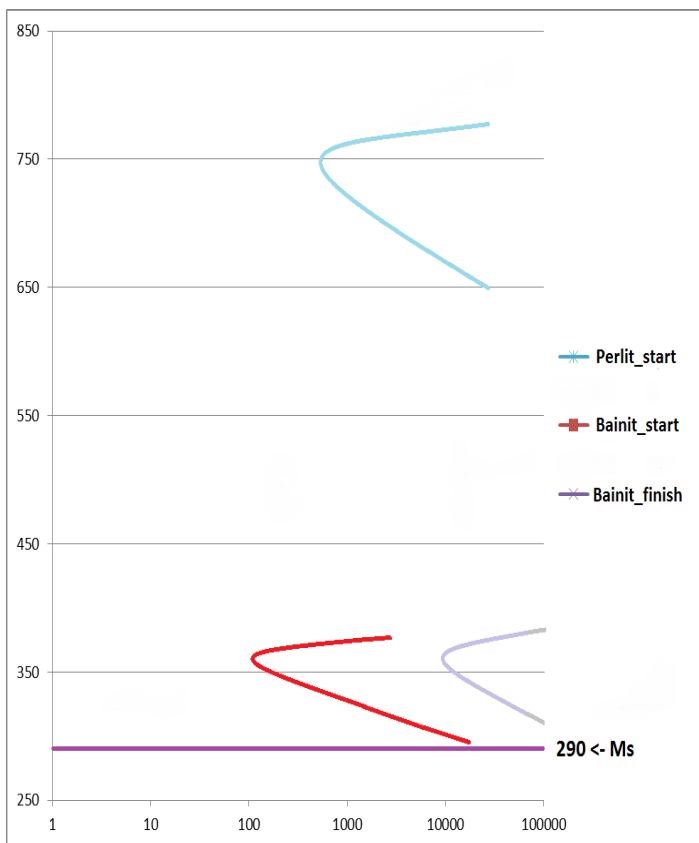


Rys. 6. Rozkład twardości w funkcji odległości od powierzchni, stal 38CrAlMo7-10

W toku prac badawczych przeprowadzono obserwacje mikroskopowe podczas których zaobserwowano odwęglenie warstwy przy powierzchni (rys. 5.). Zjawisko odwęglenia może wpływać na stopień odkształceń hartowniczych poprzez wprowadzanie niejednorodności rozkładu faz w objętości obrabianego elementu.

3.3. Wpływ rodzaju obróbki cieplnej oraz temperatury przystanku izotermicznego na odkształcenia hartownicze

Celem badania było określenie wpływu zastosowanej obróbki cieplnej oraz temperatury przystanku izotermicznego na odkształcenia hartownicze. Do tego celu użyta została stal X37CrMoV5-1, której fragment eksperymentalnego wykresu CTP_i został przedstawiony na rysunku 7. Próbki początkowo były austenitizowane w temperaturze 1030°C w czasie 15 minut, a następnie poddawane dalszym obróbkom, których parametry zostały przedstawione w tabeli 6.



Rys.7. Eksperymentalny wykres CTP, stali X37CrMoV5-1

Tab. 6. Parametry procesów obróbki cieplnej oraz wyniki badania odkształceń hartowniczych stali X37CrMoV5-1

Oznaczenie próbki	Parametry dalszej obróbki	L_p [mm]	L_k [mm]	ϵ [%]
L	Hartowanie ciągle w wodol70	3,24	3,34	3,08
M	Hartowanie ciągle w wodol70 + odpuszczanie 585°C/2h	3,25	3,51	7,90
N	Hartowanie izotermiczne w cynie 300°C/19h	3,27	3,44	5,40
O	Przystanek izotermiczny w cynie 400°C/15min, dalsze chłodzenie w wodol70	3,23	3,37	4,33
P	Przystanek izotermiczny w powietrzu 400°C/15min dalsze chłodzenie w wodol70	3,27	3,37	3,05

W wyniku przeprowadzonego badania uzyskano dwie grupy próbek: posiadających tę samą strukturę (L, O, P) oraz tę samą twardość (M, N). Próbka L hartowana w sposób ciągły z temperatury 1030°C oraz próbka P wytrzymywana izotermicznie w piecu w 400°C (w celu wyrównania temperatur w objętości przedmiotu) charakteryzują się jednakowym odkształceniem. Próbka O wytrzymywana izotermicznie w cynie odkształciła się bardziej (4,33%), czego powodem jest dużo większa intensywność chłodzenia cyny niż wodolu70 czy powietrza. Intensywność chłodzenia w sposób bezpośredni wpływa na generowanie naprężeń cieplnych wywołujących odkształcenia hartownicze.

Porównując próbki o tej samej twardości (M, N) widać, że hartowanie izotermiczne w zakresie temperaturowym występowania przemiany bainitycznej prowadzi do mniejszych odkształceń (5,4%) niż standardowe ulepszenie cieplne (7,9%). Warto także porównać wyniki odkształceń próbek L oraz M. Dodatkowe odpuszczanie po hartowaniu prowadzi do wzrostu stopnia odkształcenia (z 3,08% do 7,9%). Efekt ten można wyjaśnić przyjmując, że proces wysokiego odpuszczania może generować zarówno naprężenia cieplne (wywołane zmianami temperatury) jak i strukturalne (wywołane przemianami fazowymi), co w konsekwencji przekłada się na wielkość odkształceń hartowniczych.

4. Podsumowanie

- Zwiększenie intensywności chłodzenia prowadzi do zwiększenia odkształceń hartowniczych na skutek generowania naprężeń cieplnych. Im intensywność chłodzenia jest większa, tym większe są gradienty temperatur na długości lub w przekroju obrabianego elementu.

- Wielkość ziaren austenitu pierwotnego może wpływać na wielkość odkształceń hartowniczych. Efekt ten mógł zostać przysłonięty przez zjawisko odweglenia występujące w warstwie wierzchniej zachodzące w trakcie austenitizacji w wysokiej temperaturze. Zjawisko to prawdopodobnie doprowadziło do powiększenia się stopnia odkształceń ze względu na nierównomierny rozkład faz w objętości elementu.

- Hartowanie izotermiczne w zakresie temperaturowym występowania przemiany bainitycznej pozwala na uzyskanie właściwości mechanicznych zbliżonych do standardowego ulepszenia cieplnego, przy jednoczesnym zmniejszeniu stopnia odkształceń hartowniczych.

Podziękowania

Praca została zrealizowana dzięki wsparciu finansowemu Politechniki Warszawskiej oraz Projektu Strukturalnego nr WND-POIG.01.01.02-14-100/09, pt.: „Wytwarzanie stali o strukturze nanokrystalicznej przy wykorzystaniu przemian fazowych” realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007-2013, współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Praca zrealizowana została pod merytoryczną opieką prof. nzw. dr hab. inż. Wiesława Świątlickiego.

Literatura

- [1] L. A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, 2003, 299-304
- [2] F. Frerichs, Th. Lubben, Analysis of the distortion potential within bearing rings, Proceedings of the 6th International Quenching and Control of Distortion Conference, September 9-13, 2012, 686-698
- [3] C. M. Amey, H. Huang, P. E. J. Rivera-Diaz-del-Castillo, Distortion in 100Cr6 and nanostructured bainite, Materials and Design, 2011